

УДК 531.781.2

М.А. Мирошник<sup>1</sup>, В.Г. Котух<sup>2</sup>, Н.И. Капцова<sup>2</sup><sup>1</sup>Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В КОРПУСАХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

*Необходимость повышения надежности и качества датчиков для газового оборудования и трубопроводных систем (ГО и ТС) ставит всё более сложные задачи, связанные, прежде всего, с технологией их изготовления, сборкой и герметизацией. С увеличением сложности схемотехнических решений датчиков для ГО и ТС удельный вес стоимости сборки в общем цикле падает, при этом качество герметизации корпусов датчиков приобретает значительно большее значение, чем стоимость самого корпуса. Это обусловлено тем, что потери, вызванные отказами элементной базы из-за неудовлетворительного качества герметизации, значительно превосходят затраты, связанные с увеличением надежности герметизации и качества корпусов датчиков для ГО и ТС.*

**Ключевые слова:** датчики, влага, влагосодержание, коррозия, отказ, чувствительность.

### Постановка проблемы

В настоящее время хорошо известно, что одной из причин отказов датчиков для ГО и ТС является наличие влаги в их корпусах. Резкое увеличение плотности размещения элементной базы внутри корпусов датчиков, повышение требований к надежности их функционирования заставляет решать проблемы, связанные со снижением влагосодержания. С этой целью необходимо провести анализ источников влаги в корпусах датчиков, изучить механизм влияния влаги, определять методы контроля и способы уменьшения влагосодержания в корпусах датчиков ГО и ТС.

### Изложение основного материала

Источники влаги можно разделить на 2 группы: внутренние и внешние.

К внутренним относится выделение влаги из материалов, непосредственно контактирующий с атмосферой внутри объема корпуса датчика, таких как клей и стеклоприпой, а также влага, адсорбированная в порах керамики. К внешним относится влага, проникающая через сквозные поры, трещины, а также диффундирующая через объем полимерного материала [1, 5].

Адсорбированные на внутренней поверхности молекулы воды могут быть основным источником влаги в корпусе датчика. Начальный уровень влажности в корпусе зависит от влажности и температуры той среды, в которой происходила герметизация. Так, если герметизация производится в боксе с влажностью  $5\text{ ppm} = 10\%$  об., а крышка и корпус не подвергались специальным прогревам, то содержание влаги в корпусе измеренное при  $100^\circ\text{C}$  составит  $15000\text{ ppm} = 1,5\%$  об. Удаление влаги с поверхности корпусных деталей датчиков происходит

лишь при высокотемпературных прогревах [2]. При наличии трещин или щелей газы из окружающей среды будут проникать внутрь корпуса.

Скорость натекания определяется размером и конфигурацией трещины, а также давлением газа с использованием газа-индикатора (обычно He), которым предварительно наполняют корпус датчика. Методом гелиевого течеискателя определяется также скорость натекания газа из корпуса в вакуум. Однако интерес представляет величина скорости натекания влаги из окружающей среды в корпус, причем давление в корпусе и в окружающей среде практически одинаково (отличаются только парциальные давления паров воды).

Анализ показал, что, в зависимости от герметизации, скорость натекания газа в корпус датчика, находящийся в нормальных условиях, может быть меньше или равна скорости натекания, измеренной в вакууме течеискателем. Это обусловлено, в частности, тем, что вязкая компонента потока, пропорциональная произведению среднего давления на величину разности полных давлений для вытекания гелия в вакуум должна быть меньше, чем для натекания влаги из окружающей среды в корпус. Это может привести к отказам датчиков для ГО и ТС, что оправдывает необходимость ужесточения требований по степени герметичности их корпусов [2]. Кроме этого пары воды, сконденсированные или адсорбированные на поверхности элементной базы, либо непосредственно участвуют в деградиационных процессах, таких как коррозия металлизации, либо косвенно способствуют развитию разного рода механизмов отказов датчиков. Отказы, связанные с влиянием влаги, составляют значительную часть от общего их числа.

Основными механизмами этих отказов являют-

ся коррозия тонкопленочной металлизации и проводящих проводников элементной базы внутри корпуса датчика, электромиграция металлов, а также увеличение поверхностных токов утечки и растекания заряда с образованием каналов инверсной проводимости. Обычно наличие влаги на поверхности элементной базы может вызывать одновременно несколько деградационных процессов с преобладанием одного, чаще всего – коррозии. Экспериментальные исследования показали, что для развития коррозии, приводящей к отказам датчиков, достаточно 1-2 % - ной относительной влажности в корпусе.

Попытки устранения коррозионных отказов датчиков введением сложной 3-х-слойной металлизации с золотом (верхний слой) с двумя-тремя подслоями типа Ti – W, Ti – Pt, Ti – Pd, PtSi – Ti – Pt были малоэффективны из-за развития другого механизма отказов, также обусловленного выделением влаги, а именно – электромиграции золота. Для развития электромиграции достаточно небольшой концентрации загрязнений на внутренней поверхности корпуса датчика, при этой относительная влажность в корпусе, при которой происходят такого рода отказы, составляет обычно 0,9 - 1,2%.

Аналогичные отказы наблюдаются в случае металлизации на основе других металлов (Zn, Cu, Ag).

Возрастание влажности среды внутри корпуса датчика влечет за собой существенное увеличение поверхностной проводимости диэлектрических пленок поверхности элементной базы вследствие роста толщины пленки адсорбированной влаги. Так с увеличением относительной влажности от 5 до 98% проводимость такой пленки возрастает примерно на 7 порядков. Однако и при почти 100% - ной относительной влажности величина поверхностной проводимости не превышает 10 Ом, что для большинства датчиков не может стать причиной отказа. Так, например, в стандарте США (MIL – STO – 883B) норма на содержание паров воды в корпусе датчика при температуре 373°K установлена равной 5000ppm. Это примерно эквивалентно уровню влажности в корпусе 500 ppm при температуре 298°K. Таким образом целесообразность контроля влаги в корпусах датчиков привела к необходимости разработки средств и методов измерений, основанных на масс-спектрометрии (разрушающий контроль) и применении микродатчиков влажности различного типа (неразрушающий контроль) [3, 5].

Для оценки количественного содержания влаги в корпусах датчиков используют установки, основными частями которых являются масс-спектрометр магнитного, монопольного или квардупольного типа, обогреваемая камера для вскрытия корпуса датчика, блоки управления и обработки информации.

Методика проведения масс-спектрометрического контроля влаги в датчиках включает калибровку масс-спектрометра по эталонным газовым смесям, монтаж испытываемого датчика в термокамере, вакуумирование и сушку системы с термокамерой в течение 12-24 часов при температуре 388~398° K, стабилизацию системы с термокамерой на уровне температуры разогрева 373° K и вскрытие корпуса датчика, получение и анализ спектрограммы состава атмосферы, выходящей из корпуса датчика.

Особого внимания в этом методе контроля влаги требует длительная вакуумная сушка испытуемого изделия и всей вакуумной системы установки, необходимая для удаления адсорбированной влаги и других летучих соединений с внешней поверхности корпуса, внутренних поверхностей камеры и вакуумной системы в целом. В противном случае газ-выделение с этих поверхностей дает большой фоновый сигнал и затрудняет получение достоверных результатов, особенно при влажности менее 1.000 ppm [4].

Откачка системы для получения высокого вакуума, должна проводиться с применением безмасляных насосов, не загрязняющих объем системы. Вскрытие корпуса датчика в камере испытаний производится стальной иглой, укрепленной на механическом вакуумном вводе в камеру. Достоверность результатов контроля влаги этим методом зависит от правильности калибровки масс-спектрометра, посредством измерения интенсивности спектральных линий выбранного для калибровки газа с известным парциальным давлением его в газовой смеси или косвенного с помощью объемов, эквивалентных общему корпусу датчика и эталонного генератора влажности. Результаты калибровки при выполнении примерно 70 проверок в течение 8 месяцев колебались не более чем на 15 %.

Масс-спектрометрический метод контроля влажности среды во внутреннем объеме корпуса датчика эффективен при анализе отказов датчиков, обусловленных избыточным количеством влаги и разного рода загрязнениями в его корпусе. Но в целом этот метод контроля имеет ограниченные возможности и может использоваться только для лабораторного анализа. Организация на его основе промышленного контроля качества датчиков затрудняется большой трудоемкостью, высокой стоимостью испытания (до 1000 долларов США за проверки одного датчика), а также невозможностью перепроверки результатов из-за повреждения его корпуса при испытании. Кроме того, следует учитывать сложностью интерпретации полученных экспериментальных данных, длительность испытаний, которые приходится выполнять в специализированных лабораториях за пределами предприятия-изготовителя датчиков, а также способность опре-

делять уровень влаги только при одной фиксированной температуре (373° К). Для преодоления этих недостатков ведутся исследования, направляемые не только на улучшение калибровки, но и на модернизацию установок в целом. Например, определяют количество паров воды методом масс-спектрометрии с предварительной ионизацией газовой смеси при атмосферном давлении.

Известен также метод ИК спектрометрии, основанный на поглощении парами воды инфракрасного излучения (ИК) с длиной волны 6,3 мкм. При этом используется ИК излучение полупроводникового лазера, которое пропускается через ячейку с рабочей длиной 16 см, откачанной до давления 1,33 мПа. Пары воды, поступающие в ячейку из вскрытого корпуса, изменяют характер спектра поглощения излучения, фиксируемого ИК детектором. Пороговая чувствительность метода составляет порядка 50 ppm для корпусов объемом 5 см<sup>3</sup>, верхняя граница диапазона измеренной влажности среды равна приблизительно 10 ppm. Так же, как и масс-спектрометрический этот метод контроля влаги является разрушающим и отличается сложностью и неоперативностью.

Серьезную конкуренцию рассмотренным выше методам контроля влаги в корпусах датчиков составляют интегральные преобразователи влажности (ИПВ), встраиваемые непосредственно в корпус датчиков для ГО и ТС. Чувствительность ИПВ к парам воды обусловлена зависимостью адсорбции влаги на поверхности твердого тела или адсорбции ее в объеме гигроскопичного вещества от парциального давления паров воды в атмосфере окружающей данную поверхность или вещество.

ИПВ для контроля влаги в корпусах датчиков для ГО и ТС должны удовлетворять ряду требований, вытекающих из условий их применений, а именно иметь размеры, идентичные размерам монтируемой в корпус элементной базы, допускать без нарушения работоспособности выполнение всех сборочных операций (посадка, разварка соединений, герметизация) в режимах и условиях, используемых при изготовлении датчиков, иметь высокую чувствительность к влаге на уровне единиц ppm), быть работоспособными в широком диапазоне влажности (от единиц десятков тысяч ppm), иметь стабильные градуировочные характеристики. Кроме того, ИПВ должны быть по возможности просты, дешевы и технологичны в производстве.

Из большого числа разнообразных ИПВ перечисленным выше требованиям удовлетворяют несколько типов миниатюрных устройств, получивших практическое применение в исследованиях проблемы влажности в корпусах датчиков. Условно их можно классифицировать на конденсационные и адсорбционные.

Влажность атмосферы в корпусах датчиков для ГО и ТС измеряют по температуре точки росы конденсационными датчиками. Принцип их действия основан на явлении осаждения паров воды на поверхности корпуса датчика, охлаждаемой до температуры, при которой парциальное давление водяного пара достигает значения насыщения (температура точки росы). В момент выпадения влаги наблюдается резкий скачок в электрических свойствах внутренней поверхности корпуса. Как правило, этими устройствами фиксируется изменение поверхностной проводимости или емкости между близко расположенными электродами. Соответственно простейшее устройство этого типа представляет собой ситалл, окисленный кремний или др. диэлектрик с парой напыленных электродов. Поверхностная проводимость такого устройства при подходе к точке росы возрастает по закону близкому к экспоненциальному, а затем падает при превращении пленки сконденсированной влаги в лед, образуя на кривой характерный пик. Аналогичное устройство применяют для контроля влажности среды в корпусах датчиков на фирме Herris Semiconductor (США). Конденсационные датчики можно применять также для оценки содержания во внутренней атмосфере корпуса паров других веществ, способных при осаждении влиять на их проводимость. Большой интерес вызывает предложенный специалистами фирмы Philips Telecommunication (США) вариант конденсационного устройства, создаваемого непосредственно на поверхности элементной базы в корпусах датчика. Эта новинка открывает перспективу для организации 100%-тного контроля влагосодержания в корпусах датчиков для ГО и ТС. Сущность его заключается в измерении малой (порядка 1 пФ) паразитной емкости между проводниками элементной базы, возникающей при конденсации влаги с помощью чувствительного емкостного моста. Изменение паразитной емкости вызывает в схеме напряжение дисбаланса, которое усиливается и после выпрямления вводится на графопостроитель. Температура на поверхности элементной базы фиксируется по величине падения напряжения на одном из сформированных диодов, которое меняется с температурой почти линейно со скоростью порядка 2 мВ/град. Для охлаждения применяется миниатюрный ИПВ с медным стержнем, на который устанавливается испытываемый корпус. Конденсация паров воды на наружных поверхностях корпуса датчика между выводами может исказить результаты контроля, поэтому корпус при испытании помещается в небольшую камеру с осушителем. Ограниченная чувствительность ИПВ необходимость локального охлаждения их поверхности и др. являются недостатками конденсационного метода исследования влажности среды в корпусах, что привело к тому, что бо-

лее широкое развитие и применение получила другая их группа - адсорбционные ИПВ. В устройствах этого типа используют либо пористые неорганические сорбент, либо органические полимерные пленки с большим объемным влагопоглощением. Фирмой Panametrics (США) разработан алюмосиликатный ИПВ. Он состоит из последовательно сформированных из окисленного кремния слоев Al-я (нижний электрод), пористой окиси Al-я (диэлектрик-сорбент) и влагопроницаемого тонкого слоя золота (верхний электрод). Дальнейшее совершенствование ИПВ будет идти в направлении повышения температурной устойчивости и временной стабильности характеристик, воспроизводимости результатов измерений, а также снижения эффекта адсорбционно-гистерезиса, присущего всем ИПВ этого типа.

В последнее время интерес к керамике как к материалу для создания твердотельных ИПВ существенно возрос. Это также коснулась методов измерения влажности.

По виду электрической проводимости керамические ИПВ делятся на 2 типа, в том числе с полной проводимостью и электронной. В ИПВ ионного типа уменьшение полного сопротивления сенсорного элемента при увеличении относительной влажности обусловлено физической адсорбцией на поверхности и конденсацией в микрокапиллярах молекул воды.

В датчиках с электронной проводимостью логарифм проводимости линейно зависит от логарифма концентрации водяного пара. В этом случае молекулы воды, связанные с поверхностью керамики процессом хемосорбции, действуют как донорские центры, отдающие керамике электроны. В зависимости от преобладающего типа проводимости этот процесс может уменьшать или увеличивать в ней электронную проводимость. Разработка ИПВ считается перспективным научно-техническим направлением в создании новой элементной базы для современных газовых измерительных систем. В настоящее время созданы и применяются различные типы в микроэлектронных фотоэлектрических ИПВ, тепловых ИПВ, ИПВ концентрации ионов, а также влажности. Работа ИПВ для определения точки росы основана на обнаружении конденсированной влаги на охлажденной до температуры выпадения росы поверхности ИПВ. При этом как правило, выходной электрический сигнал пропорционален массе влаги, выпавшей в конденсат. Наличие сконденсированной влаги может быть определена оптоэлектронными и электрическими методами, а температура точки росы регистрируется в таком ИПВ с помощью температурного сенсора.

Большой интерес представляют волоконнооптические ИПВ в основе которых лежит изменение оптических свойств поверхности волоконнооптиче-

ского кабеля под воздействием влаги. В качестве поверхностного материала используются специальные гидрофобные стекла. Водяные пары, воздействуя на отражательную поверхность кабеля, меняют коэффициент отражения, моделируя световой поток.

В качестве ИПВ используют также интегральные решетки Брэгга. В таких устройствах коэффициент отражения лазерного луча, падающего на сфокусированную методами электронной технологии микрорешетку, меняется в зависимости от содержания конденсированной влаги. Более простым, способом регистрации конденсированной влаги на охлаждаемой поверхности, по сравнению с оптоэлектронным способом является измерение поверхностного сопротивления или емкости между двумя гребенчатыми электродами, сфокусированными на этой поверхности. Например, разработанный в Массачусетском технологическом институте ИПВ, сокращенно обозначаемый MCP-МО (Meander Capacitance Sensor), предназначен, как для измерения относительной влажности, так и точки росы.

ИПВ, как это отмечалось выше, требуют использования устройств охлаждения активной поверхности датчика. В ИПВ для этих целей целесообразно применение термоэлектрических эффектов Пельтье и Томпсона.

Широко распространены также тонкопленочные ИПВ, у которых основа –  $Al_2O_3$ . Они получили широкое распространение в связи с простотой технологии их изготовления. По принципу действия они во многом схожи с керамическими ИПВ. Основным процессом, определяющий чувствительность к парам воды, является физическая адсорбция. Такой ИПВ представляет собой плоский конденсатор, одной из обкладок которого является пленка алюминия, диэлектриком - пористая пленка  $Al_2O_3$ , полученная анодированием алюминия, причём верхней обкладкой служит напылённая тонкая пленка золота, проницаемая для паров воды.

Статистические экспериментальные исследования  $Al_2O_3$  датчиков влажности, поставляемых Исследовательским центром ВВС США, приведенные в Национальном бюро стандартов США (National Bureau of Standards), показали, что разброс чувствительности может составлять до 100 %, т.е. необходимо проведение индивидуальной калибровки каждого датчика. ИПВ на основе  $Al_2O_3$  находят широкое применение, причём основной интерес представляет их использование в качестве анализаторов влаги в корпусах датчиков для ГО и ТС. Изготовление таких ИПВ позволяет оценивать уровень влажности в корпусе датчика даже в процессе самой эксплуатации, устанавливать корреляцию между влажностью, режимом работы и причинами отказов элементной базы, проигнорировать отказы и выра-



батьовувати рекомендації по удлучшенню якості корпусов датчиків, а також вибору оптимальних матеріалів, наприклад плат елементної бази, котрі самі способні виділяти вологу в корпус і, в итоге, - снижати надійності датчиків.

Одним из способів удменьшення вологосодержання в корпусах датчиків для ГО і ТС являється також використання вологопоглотителів. По принципу дії вологопоглотителі ділять на сорбційні і реактивні. Первіє можуть не тільки поглинати, но і возвращати накопившюся в них вологу в зависимости вологості атмосфери. Вторіє необратимим образом связують вологу в результаті протікання в них хімічних реакцій. Их готують в виде паст, растворов или порошка, после чего их помещають на свободное место в корпусе (обычно в полости крышки корпуса датчика) [4].

Из вологопоглотителів сорбційного типа найбільш широко распространены алюмосиликаты. Наибольший интерес представляє мікроосушитель, принцип дії котрого оснований на электролитической разложении вологи в объеме твердого электролита - полимерного материала Nation фирмы DU Pont (США), котрый можно было бы встраивать в корпус датчика. Осушитель работает при подаче на электроды напряжения 2В частотой 10 Гц, посредством котрого можно по расчетам разложить 1 г воды за год експлуатации при токе электрода 1 мА. Конструкцией осушителя также предусмотрен отвод в окружающую среду  $H_2$  и  $O_2$  после разложения вологи. Такие вологопоглотители, как цеолиты, нередко вводят в герметизирующие полимерные покрытия в измельченном виде для удменьшения диффузии через них молекул воды [1].

### Выводы

1. Одной из основных причин отказов датчиків для ГО і ТС являється наличие вологи в их корпусах.
2. Начальный уровень вологості в корпусе датчика зависит от вологості и температуры среды, в котрой происходила герметизация.
3. Основными механизмами отказов, связанных с влиянием вологи являются коррозия тонкопленочной металлизации и проволочных проводников элементной базы, электромиграция металлов, а также

увеличение поверхностных токов утечки и растекания заряда с образованием каналов инверсной проводимости.

4. Для оценки количественного содержания вологи в корпусах датчиків для ГО і ТС используют масс-спектрометрический метод контроля, метод ИК-спектрометрии, а также ИПВ, встраиваемые непосредственно в корпус датчика.

5. Наиболее широкое применение среди ИПВ нашли конденсационные и адсорбционные.

6. Одним из способов удменьшення вологосодержання в корпусах датчиків для ГО і ТС и установок на их основе является использование вологопоглотителей.

### Литература

1. Теверовский А. А., Коваленко А. А. Волога в корпусах полупроводниковых приборов. *Зарубежная электронная техника*, № 2 (309), 1997 г.
2. Бутурлин А. И. и др. Микроэлектронные датчики вологості. *Зарубежная электронная техника*, №9, 1994 г.
3. Ковишиков Е. К. и др. Исследование состава газовой среды при герметизации шовной контактной сваркой на остаточное содержание вологи и кислорода в корпусе - *Электронная техника. Сер. 7, ТОПО*, вып. 2 (123), 1994.
4. Котух В. Г. Установка глубокой осушки и очистки смесей инертных газов для герметизации радиоэлектронной аппаратуры // *Радиотехника. Всеукр. Межвед. науч.-техн. об.*: 1997, Вып. 104, с. 196-201.
5. Котух В. Г., Ратников С. П. К вопросу снижения вологосодержання в корпусах изделий радиоэлектронной аппаратуры // *Технология приборостроения*, 1998, с. 15-20.

**Автор:** МИРОШНИК Марина Анатолієвна

Українська державна академія залізничного транспорту, Харків, доктор технічних наук, доцент.

E-mail – marinagmiro@gmail.com

**Автор:** КОТУХ Володимир Григорієвич

Харківський національний університет городского хозяйства им А.Н. Бекетова, Харків, кандидат технічних наук, доцент.

E-mail – marinagmiro@gmail.com

**Автор:** КАПЦОВА Наталія Іванівна

Харківський національний університет городского хозяйства им А.Н. Бекетова, Харків, ассистент

E-mail – marinagmiro@gmail.com

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ЗНИЖЕННЯ ВОЛОГОВІСТУ В КОРПУСАХ ДАТЧИКІВ ДЛЯ ГАЗОВОГО ОБЛАДНАННЯ І ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

М.А. Мирошник, В.Г. Котух, Н.І. Капцова

Необхідність підвищення надійності та якості датчиків для газового обладнання та трубопровідних систем (ГО і ТС) ставить все більш складні завдання, пов'язані, насамперед, з технологією їх виготовлення, збіркою і герметизацією. Зі збільшенням складності схемотехнічних рішень датчиків для ГО та ТС питома вага вартості збірки в загальному циклі падає, при цьому якість герметизації корпусів датчиків набуває значно більше значення, ніж вартість самого корпусу. Це обумовлено тим, що втрати, викликані відмовами елементної бази через незадовільний якість герметизації, значно перевищують витрати, пов'язані зі збільшенням надійності герметизації і якості корпусів датчиків для ГО та ТС.

**Ключові слова:** датчики, волога, вологовіст, корозія, відмова, чутливість.